

**Найнг Вин**

**ПАНОРАМНЫЙ ДАТЧИК С КОДИРУЮЩИМ КОЛЛИМАТОРОМ  
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва, 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский инженерно-физический институт (государственный университет)»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент,  
Колесников Святослав Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
МИФИ  
Големинов Николай Георгиевич

кандидат физико-математических наук,  
РНЦ "Курчатовский институт"  
Каретников Максим Донатович

Ведущая организация: ФГУП "ВНИИТФА" Федеральное государственное  
унитарное предприятие "Всероссийский научно-  
исследовательский институт технической физики и  
автоматизации"

Защита состоится **29 мая 2007 года в 12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *МИФИ*

Автореферат разослан "27" апреля 2007 г.

Просим принять участие в работе Совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

В.В. Дмитренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

По данным МАГАТЭ, в мире постепенно растет количество радиоактивных материалов, используемых различными отраслями науки и техники. Однако, из-за того, что радиоактивные материалы относятся к классу особо опасных веществ, любое халатное, неаккуратное или невежественное обращение с ними может привести к радиоактивному загрязнению местности. Ликвидация возникших очагов загрязнения требует точной локализации места излучения. При этом целесообразно минимальное участие человека при проведении таких работ, для чего необходимо создавать максимально автоматизированные системы радиационного мониторинга окружающей среды в широких диапазонах энергии регистрируемых частиц. При радиационном мониторинге ограниченных территорий или труднодоступных для человека мест необходимо уметь правильно определять пространственное распределение поля гамма-излучения и местоположение источников, создающих это поле.

Одной из важнейших технических задач в настоящее время является задача установления полного контроля над миграциями радиационных материалов. Поэтому требуются эффективные системы защиты ядерных материалов и установок от хищений и диверсий в целях обеспечения как нераспространения, так и радиационной безопасности.

Также, в нынешнее время особую важность имеет проблема предотвращения ядерного терроризма, возникающего при бесконтрольном распространении ядерных материалов.

Для решения этой проблемы требуется установление полного контроля над миграциями радиационных материалов. Поэтому необходимы эффективные системы защиты ядерных материалов от хищений и диверсий в целях обеспечения как нераспространения радиоактивных материалов, так и радиационной безопасности.

Для решения данных задач применяются детекторы ядерного излучения различных конфигураций, в состав которых входят: первичный регистратор фотонного излучения и системы сбора и обработки информации, работающая в режиме реального времени.

К их числу относится и панорамный датчик с кодирующим коллиматором, позволяющий определить направления на источник фотонного излучения (ИФИ). Наиболее эффективно данный детектор может быть использован для выявления ИФИ в узких замкнутых пространствах, где невозможно или затруднено перемещение детектора.

**Целью работы является.** Создание метода определения направления на источник фотонного излучения по данным, получаемым с панорамного датчика с кодирующим коллиматором.

### **Задачи работы**

- разработка конструкции макета панорамного датчика с кодирующим коллиматором, расчет параметров коллиматора и выбор первичного регистратора фотонного излучения;
- изготовление коллиматора с кодирующей апертурой;
- построение метода проведения измерений с помощью созданного детектора;
- разработка методов определения направления на источник по данным, полученным от панорамного датчика с кодирующим коллиматором;
- проверка работоспособности методов и макета детектора.

### **Научная новизна работы**

- конструкция панорамного датчика с кодирующим коллиматором для определения направления на источник фотонного излучения;
- алгоритм определения направления на источник фотонного излучения с использованием панорамного датчика с кодирующим коллиматором;
- метод определения направления на источник фотонного излучения по информации, получаемой от панорамного датчика с кодирующим коллиматором, основанный на свойстве матриц циркулянта;
- метод определения направления на источник фотонного излучения по информации, получаемой от панорамного датчика с кодирующим коллимато-

ром, построенный с использованием нейронной сети прямого распространения.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что:

- предложен способ построения кодирующего коллиматора для определения направления на источник фотонного излучения;
- создан макет панорамного датчика с кодирующим коллиматором для определения направления на источник фотонного излучения в физически ограниченных местах;
- разработано два метода определения направления на источник фотонного излучения с применением панорамного датчика с кодирующим коллиматором.

**Автор выносит на защиту**

- конструкцию панорамного датчика с кодирующим коллиматором для определения направления на источник фотонного излучения;
- алгоритм определения направления на источник фотонного излучения с использованием панорамного датчика с кодирующим коллиматором;
- метод определения направления на источник фотонного излучения по информации, получаемой от панорамного датчика с кодирующим коллиматором, основанный на свойстве матриц циркулянта;
- метод определения направления на источник фотонного излучения по информации, получаемой от панорамного датчика с кодирующим коллиматором, построенный с использованием нейронной сети прямого распространения.

**Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы были доложены на научных сессиях МИФИ 2005 и 2007 годах, на 4-ой Курчатовской молодежной научной школе в 2006 году и опубликованы в журнале «Инженерная физика».

Общее число работ по теме диссертации 5. Одна работа опубликована в журнале «Инженерная физика» (в печати).

#### **Личное участие автора:**

- разработка и создание кодирующего коллиматора;
- построение алгоритма определения направления на источник фотонного излучения с использованием панорамного датчика с кодирующим коллиматором;
- разработка двух методов определения направления на источник фотонного излучения;
- проведение экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенных методов и макета детектора.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 72 страницы, в том числе 38 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 26 наименований.

Работа выполнена на кафедре “Прикладная ядерная физика” факультета “Физики и экономики высоких технологий” Московского инженерно-физического института (Государственного университета).

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Для решения задач поиска источников ионизирующего излучения и контроля состояния территории с радиоактивным загрязнением используются системы радиационной разведки и радиационного контроля. Большинство этих систем могут применяться как для радиационной разведки, так и для радиационного контроля.

Системы радиационного мониторинга можно разделить на два класса: стационарные и мобильные. Стационарные системы радиационного мониторинга построены на основе использования автоматических пороговых детекторов, осуществляющих сигнализацию о превышении заданного порога уровня радиоактивного загрязнения в определенном числе контрольных точек или на основе дозиметров. Данная система мониторинга оборудуется стационарными средствами коммуника-

ций и средствами обеспечения безопасности системы сбора информации. Данные поступают в центральную лабораторию, где результаты проходят обработку и анализ в вычислительном центре с использованием математических моделей распространения загрязнения с учетом рельефа местности и метеообстановки.

Другой класс - это системы радиационного контроля, основанные на базе мобильных групп ручного дозиметрического контроля, сложных автомобильных или самолетно-вертолетных комплексов для сбора информации и последующей ее обработки в стационарных условиях.

Существующие мобильные группы могут использоваться и на заранее неподготовленных и неизвестных участках местности. Однако подобные комплексы обладают рядом недостатков. Оптимальная высота для самолетной съемки составляет 50-250 метров. Эти комплексы предъявляют высокие требования к квалификации персонала, как при эксплуатации, так и при техническом обслуживании. К тому же они малоэффективны для решения задач экологического мониторинга в населенных пунктах, особенно в больших городах с высоко развитой инфраструктурой.

Наглядным примером полевого варианта систем дозиметрического контроля скомплексированных с самолетно-вертолетным комплексом для сбора информации может послужить "Вертолетный комплекс для обнаружения и картирования радиоактивных загрязнений местности" разработанный Государственным унитарным предприятием "Научно - производственное объединение Астрофизика". Изготовлен макетный образец и в ноябре 1996 года проведены его летные испытания на вертолете МИ-24.

Комплекс предназначен для дистанционного обнаружения, определения интенсивности, энергетического спектра и координат зон радиоактивного загрязнения местности и позволяет в реальном масштабе времени обнаружить источники радиоактивного загрязнения, определить их местоположение и выявить границы зон локального радиоактивного загрязнения местности в полосе шириной более 100 метров вдоль трассы полета вертолета, при скорости полета до 150 км/час на высотах до 100 метров.

Существующие на данный момент методы радиационной разведки местности делятся на пешеходную радиосъемку и дистанционную спектрометрию.

Пешеходная радиосъемка осуществляется путем хождения по заранее выбранному маршруту (сетке) с дозиметром и последующим нанесением изодоз на карту. Недостатки этого метода очевидны: малая скорость обследования, невозможность обработки информации в режиме реального времени и идентификации радионуклидов.

Эффективность мероприятий, направленных на ликвидацию последствий аварий на предприятиях атомной промышленности, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, в значительной степени зависит от полноты и оперативности информации о радиационной обстановке, обусловленной этой аварией. В случае, если среди радиоактивных веществ, попавших в окружающую среду, присутствуют гамма-излучающие радионуклиды, такая информация может быть получена методами дистанционной гамма-спектрометрии.

Одним из примеров наземного метода является метод поиска источников ионизирующего излучения, в котором используется регистрирующая аппаратура с системой коллиматоров.

На базе этой методики создаются новые системы по поиску и локализации источников радиации. Изменяя телесный угол детектора, снимают серию показаний, прослеживая изменения в скорости счета детектора. При помощи этой методики решают следующие задачи:

- \* нахождение градиента поля излучения;
- \* определение количества источников излучения;
- \* определение характеристик поля излучения.

Но, к сожалению, эта методика трудоемка и требует высокого профессионализма обслуживающего персонала. К недостаткам этой системы следует также отнести невозможность работы в режиме реального времени.

Анализ функциональных задач радиационного контроля позволяет установить основную группу радиационных показателей, представляющих собой характеристики и параметры полей ионизирующих излучений.

- Вид ионизирующего излучения - гамма-излучение и нейтроны (в отдельных случаях альфа-частицы, бета-излучение).
- Поток ионизирующего излучения - количество частиц (квантов) излучения

в единицу времени (нейтр./с, квант /с).

- Спектральный состав излучения, в основном, спектр гамма-излучения.
- Плотность потока гамма - или нейтронного излучения на заданном расстоянии от объекта контроля (квант/см<sup>2</sup>с, нейтр./ см<sup>2</sup>с).
- Дозовые характеристики излучений - мощность экспозиционной дозы гамма-излучения и эквивалентная доза нейтронов (Зв/ч, Зв).

Рассматриваемая группа радиационных показателей полностью описывает состояние и положение объектов контроля, а регистрация и измерение одного из них или их совокупности обеспечивает получение необходимой исходной информации для обнаружения и идентификации основных опасных материалов и веществ и принятия обоснованных решений.

Регистрация радиационных полей производится с помощью известных методов радиометрии, спектрометрии и дозиметрии. При этом в подавляющем числе реальных ситуаций контроля применяются пассивные методы, базирующиеся на регистрации собственных и вторичных ионизирующих излучений.

В отдельных случаях, например, для обнаружения очень малых количеств делящихся материалов или помещенных в защитные контейнеры, а также для контроля ручной клади и транспортных средств при подозрении на наличие в них не делящихся ядерных материалов (бериллия, соединений трития и т.п.), а также взрывчатых и особо опасных химических веществ, могут использоваться активные методы контроля. Они основаны на регистрации наведенного зондирующим излучением индуцированного излучения контролируемого объекта. Эти методы отличаются высокой чувствительностью и избирательностью.

При проведении поиска источника ионизирующего излучения на физически ограниченных территориях (внутри зданий, на складах и т.п.), а также в трудно доступных местах (шахтах, колодцах) необходимо иметь возможность с высокой степенью достоверности определять направление на источник. Для этих целей наиболее подходящей является идея построения прибора на основе мультиплексного принципа регистрации излучения, который позволил спроектировать один из вариантов панорамного датчика с кодирующим коллиматором (ПДКК), который состоит из коллиматора и детектора для регистрации фотонного излучения. В отличие

от аналогичных коллиматоров, используемых в медицине, циклическая смена кодовой последовательности в нем осуществляется за счет вращения самого коллиматора, а регистрация излучения происходит боковой, а не торцевой поверхностями.

При помощи кодирующего коллиматора происходит регистрация интегрально-кодированного образа ( $n_i$ ) искомой функции пространственного распределения потоков ионизирующего излучения, создаваемых произвольно расположенными источниками, а не непосредственно ее значения ( $x_j$ ). Таким образом:

$$n_i = \sum_{j=1}^N K_{ij} \cdot x_j + \Phi_i, \quad (1)$$

где  $K_{ij}$  - матрица интегрально-кодированного преобразования (при традиционных измерениях  $K_{ij} \equiv I_{ij}$  - единичная диагональная матрица),  $\Phi_i$  - величина фоновых и шумовых импульсов.

Выполнение требований оптимального планирования эксперимента приводит к матрице  $K_{ij} = H_{ij}$ , состоящей из набора значений: “+1” и “-1”, которая называется матрицей Адамара порядка  $N$ . Матрицы Адамара - это единственные матрицы опыта, которые минимизируют обобщенную, среднюю и максимальную дисперсии результатов. Решение системы линейных уравнений (1) дает следующее:

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{ij}^T (n_i - \Phi_i) \\ \hat{H}^T \hat{H} &= N \hat{I} \\ D(x_j) &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N [D(n_i) + D(\Phi_i)] \end{aligned}$$

где  $D(x_j)$ ,  $D(n_i)$  и  $D(\Phi_i)$  являются дисперсиями, соответственно, искомой величины, измеряемой скорости счета импульсов и фона. Следовательно, мультиплексные измерения позволяют в  $N$  раз снизить среднюю дисперсию результатов измерений.

Техническая реализация мультиплексного принципа измерений позволяет сконструировать позиционно-чувствительные датчики для определения пространствен-

ной локализации радиоактивных источников. Один из вариантов структурной схемы такого датчика приведен на рис.1.

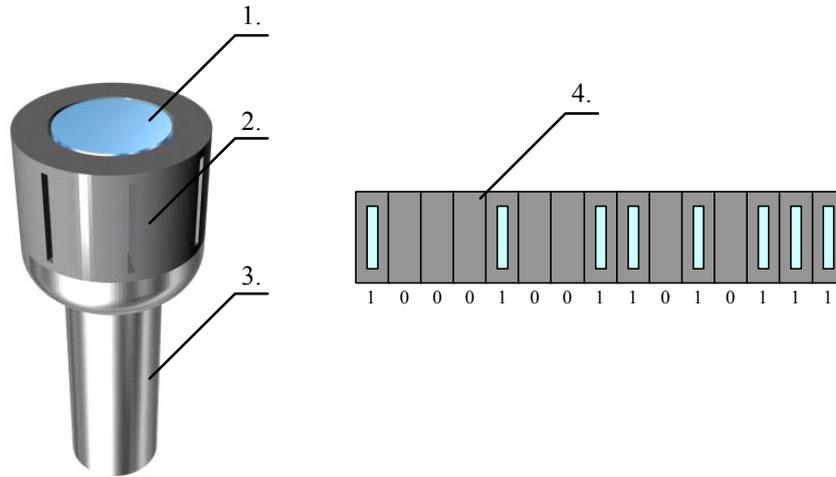


Рис. 1. Структурная схема панорамного датчика с кодирующим коллиматором 1 - сцинтиллятор для регистрации гамма-излучения; 2 - цилиндрический коллиматор, выполненный из поглощающего материала со щелевыми каналами; 3 – фотоэлектронный умножитель; 4 - развертка коллиматора и псевдослучайная последовательность чисел из 1 и 0 длиной  $N = 15$ , описывающая состояние каналов в коллиматоре; 5 - развертка коллиматора дополнительного датчика и инверсная псевдослучайная последовательность ( $N = 15$ ); 6 - схема взаимного расположения двух датчиков; 7 – система сбора и обработки данных (Notebook).

Особенностью такого датчика является возможность одновременной регистрации излучения, поступающего из азимутального угла, равного  $360^0$ . Модуляция излучения в ПДКК может осуществляться за счет взаимонезависимого возвратно-поступательного движения экранирующих элементов или за счет дискретных поворотов коллиматора(ов) на угол  $\alpha_i = \frac{360}{N}$  вокруг своей оси. В этом случае матрица  $K_{ij}$  образована циклической перестановкой первой строки, совпадающей с псевдослучайной (0,1) последовательностью длиной  $N - 1$ , ( $\hat{K}^T \hat{K} = \frac{N}{4}(\hat{I} + \hat{E})$ ),  $\hat{E}$  - матрица, целиком состоящая из единиц.

Среднее пропускание модулирующих щелей коллиматоров составляет около 50 %. Эта величина оптимальна при поиске точечных источников ионизирующего излучения, т. е. когда  $x_j$  хорошо аппроксимируется небольшим числом  $\delta$ -функций.

Среднее пропускание модулирующих щелей коллиматоров составляет около 50 %. Эта величина оптимальна при поиске точечных источников ионизирующего излучения, т. е. когда  $x_j$  хорошо аппроксимируется небольшим числом  $\delta$ -функций.

Конструкция макета ПДКК содержит следующие модули: кодирующий коллиматор; систему вращения коллиматора и блок регистрации излучения, и обладает характеристиками:

1. Габаритные размеры ПДКК:
  - a. высота, мм 400
  - b. диаметр, мм 124
2. Размеры коллиматора
  - a. высота, мм 55
  - b. внешний диаметр, мм 120
  - c. внутренний диаметр, мм 60
  - d. высота щелевого отверстия, мм 55
  - e. ширина щелевого отверстия, мм 10
3. Масса ПДКК 10 Кг
4. Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl)
5. Размеры сцинтилляционного кристалла 40x40

Метод определения направления на ИФИ является неотъемлемой частью созданного макета ПДКК. При этом, чем лучше работает метод, тем с большей достоверностью и за меньший интервал времени можно определить положение источника. В настоящий момент было разработано два метода: метод в котором применяется традиционная математика (матриц циркулянта) и метод с применением нейронных сетей.

Если рассматривать методы с точки зрения работы оператора, то для него нет существенной разницы, какой именно математический аппарат заложен в работу детектора. Функциональная последовательность проведения измерений и обработки данных одинаковая (рис. 2).

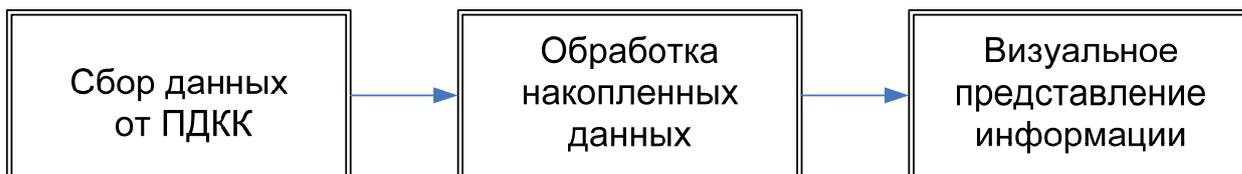


Рис. 2 Функциональная последовательность определения направления на ИФИ

Первым шагом необходимо собрать информацию о распределении потока фотонного излучения в месте нахождения детектора, затем обработать результаты с помощью одного из описанных ниже методов, а по окончании обработки представить их в удобном для анализа виде.

Процесс сбора информации о распределении потока фотонного излучения происходит по следующему алгоритму:

1. детектор располагается на местности и ориентируется первым щелевым отверстием на север;
2. затем осуществляется набор спектрального распределения в ходе заданного промежутка времени;
3. по окончании измерения детектор поворачивается вокруг своей оси на  $24^\circ$  по часовой стрелке;
4. измерения повторяются 15 раз (для данной модели коллиматора).

По окончании всех измерений из 15 набранных спектров формируется матрица для последующего анализа одним из методов. Формирование данных может происходить как по определенному энергетическому диапазону, так и по всему спектру. Формирование данных по конкретному энергетическому диапазону целесообразно осуществлять, если заранее известен тип источника.

Так же формирование данных по конкретному энергетическому диапазону позволяет существенно улучшить отношение сигнал/фон, что, в свою очередь, улучшает качество определения направления на источник.

Для выявления направления повышения уровня радиационного излучения, необходимо произвести сканирование интенсивности излучения плотности потока в данной точке местности в радиальных направлениях, для чего можно производить измерение скорости счета в секторах, на которые разбит полный азимутальный угол (рис 3). На рисунке изображена общая схема проведения измерений по выявлению направления повышения уровня радиационного излучения. Толстой линией (1) показана граница окружности, из центра которой производятся измерения в радиальных направлениях скоростей счета  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  и т. д. Штрихпунктирной линией показано условное разбиение полного азимутального угла на сектора, причем величина сектора  $\Delta\phi$  одинаковая для всех секторов. Координатными осями

(2) показано, что при проведении эксперимента, необходимо учитывать расположение секторов и их ориентацию на местности, для осуществления привязки производимых оценок скоростей счета в секторах, с последующим выявлением направления на источник.

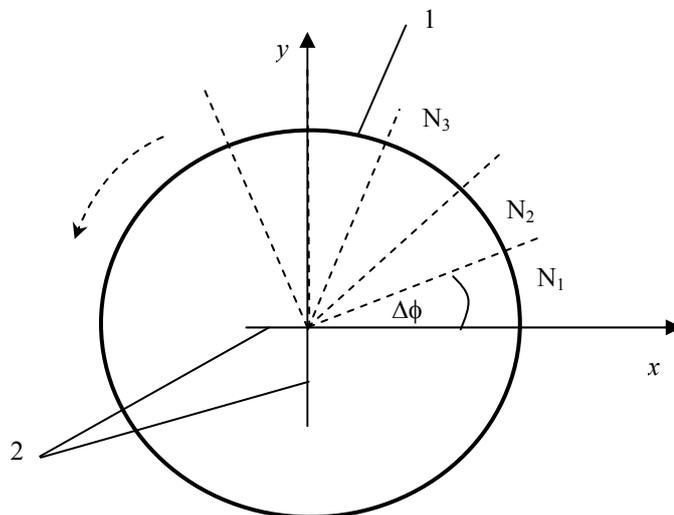


Рис 3. Геометрия проведения эксперимента при радиальном сканировании интенсивности излучения местности:  $N_1$ ,  $N_2$ , - скорости счета в секторах,  $\Delta\phi$  - угол поворота измерительной системы равный размеру сектора; 1 – линия границы по которой происходит восстановление плотности потока излучения; 2 – ориентирующие оси, для привязки к местности

При построении измерительных приборов, осуществляющих данный способ измерения, можно использовать различные решения, которые не всегда рациональны и не позволяют получить результаты с достаточной точностью, из – за чего могут возникнуть ошибки в определении направлений на источники. К примеру, при традиционном подходе к решению данной задачи, экспериментатор производил бы измерение скорости счета в каждом секторе отдельно от остальных, используя коллиматор достаточной толщины, для снижения интенсивности излучения и экранировки от других секторов. В свою очередь это приводит к лишнему расходу материалов и, кроме того, не оптимально в рамках некоторых важных критериев планирования эксперимента. Затем сам прибор должен представлять полностью автоматизированную систему, чтобы исключить воздействие радиации на организм человека.

Используя принцип мультиплексности при конструировании прибора, можно избежать выше перечисленные недостатки, т. е. сделать прибор более компактным, повысить точность, упростить систему автоматизации.

Под мультиплексными подразумеваются такие системы измерений, в которых информация, поступающая из прибора, имеет вид интегрального образа исследуемой функциональной зависимости, а не является её отсчетами непосредственно, как в традиционных приборах.

Системы, использующие данный принцип измерения, разрабатываются достаточно давно и нашли своё применение в таких областях как томография, интроскопия, спектрометрия, различных детекторов частиц.

Полезные свойства данных систем вытекают из более оптимального использования пространства независимых переменных (в нашем случае независимыми переменными являются скорости сета в каждом отдельном секторе) – это одна из тех принципиально новых идей, которые внесла математическая статистика в теорию эксперимента.

Преимущества мультиплексного прибора реализуются тогда, когда полная дисперсия результатов измерений определяется не статической ошибкой числа зарегистрированных квантов излучения или элементарных частиц, а другими факторами, например, фоном постороннего излучения, шумами детекторов частиц, независимыми от величины регистрируемого сигнала, или дрейфом параметров аппаратуры при длительных измерениях. Действие всех факторов существенно ослабляется, если измерения вести при помощи мультиплексного прибора.

Прибор, предназначенный для выявления повышения уровня радиационного излучения и определения направления на источник, построен с использованием принципа мультиплексности, производит сканирование плотности потоков излучения серией измерений величин, каждое из которых представляет собой линейную комбинацию скоростей счета в дискретных секторах, на которые разбит весь азимутальный угол, т.е. измерение скорости счета производится не в каждом отдельном секторе, а сразу в нескольких секторах (что достигается особой конструкцией коллиматора). При этом результаты поступающие с детектора могут быть представлены в следующем виде:

$$y_i = c_i + \beta_0 x_i^0 + \beta_1 x_i^1 + \dots + \beta_N x_i^N$$

где  $y_i$  - скорость счета числа импульсов зарегистрированная детектором в  $i$  - измерении;  $x_i^0, x_i^1, \dots, x_i^N$  - скорости счета числа импульсов в дискретных секторах раз-

бывающих полный азимутальный угол в  $i$  - измерении;  $c_i$  – скорость счета фона обусловленного различными факторами при проведении эксперимента;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_N$  - коэффициенты представляющие собой интегрально кодовое преобразование, учитывающие план эксперимента, а так же не идеальности коллимирующей системы.

Математическое ожидание получаемой информации можно записать в матричной форме:

$$\hat{y} = \hat{B} \times \hat{x} + \bar{c}$$

Матрицу  $\hat{B}$  (матрица интегрально кодового преобразования) удобно представить как произведение двух матриц, одна из которых представляет собой план эксперимента или матрицу опыта, а вторая отражает неидеальность коллиматора и детектирующей системы, т. е. представить результаты измерений как:

$$\hat{y} = \hat{A}\hat{T} \times \hat{x} + \bar{c}$$

где  $\hat{A}$  - матрица опыта,  $\hat{T}$  - аппаратная матрица учитывающая неидеальность коллиматора. При определённых допущениях проведения эксперимента, матрицу  $\hat{T}$  удобно представить как единичную диагональную матрицу и не учитывать при решении обратной задачи. Матрица опыта ( $\hat{A}$ ), предназначена для формирования интегрально - кодового образа исследуемой функции и минимизировать дисперсию производимых оценок скоростей счета в секторах. Определение вида матрицы т. е. её размерности, факторного пространства, способов построения и т. д. относится к области математики называемой факторное планирование эксперимента.

Оценку искомых параметров  $\hat{x}$  и их дисперсии, можно производить используя метод наименьших квадратов либо в случае если число измерений  $\hat{y}$  равно числу неизвестных параметров  $\hat{x}$  (матрица  $\hat{A}$  квадратная) можно воспользоваться формулой:

$$\hat{x} = \hat{A}^{-1} \hat{y};$$

$$\hat{D}(\hat{x}) = [\hat{A}^T \hat{D}^{-1}(y) \hat{A}]^{-1};$$

При построение приборов для решения известной задачи можно использовать матрицы опыта двух типов, а именно матрицы Адамара и матрицы циркулянты. Различие между данными матрицами состоит в использовании различного факторного пространства, т. е. при построении матрицы Адамара элементы матрицы при-

нимают значения  $-1$  и  $1$ , а при построении матрицы циркулянта элементы принимают значения  $0$  и  $1$ .

С появлением первых компьютеров у человечества появилась новое желание - создание искусственного разума способного помогать ему в решении различных задач. Сейчас, в начале 21 века, это уже практически произошло. Человек научился моделировать поведение мозговых клеток (нейронов) и создавать небольшие по сложности интеллектуальные системы. Не стороной это направление обошло и ядерную физику. Создавая новые ядерно-физические приборы в них внедряются новые интеллектуальные системы обработки данных и принятия решения.

При разработке структуры нейронной сети преследовалась основная цель – улучшить качество определения направления на источник, по сравнению с традиционными методами. Нейронные сети строятся по принципу организации и функционирования их биологических аналогов – сетей нервных клеток (нейронов) мозга, где имитация работы клеток мозга осуществляется через математический аналог нейрона

В случае анализа информации от ПДКК имеется набор из 15 значений скоростей счета. После обработки информации необходимо получить 15 значений, в которых будет указана вероятность нахождения в данном секторе ИФИ.

В качестве решения данной задачи было предложено использовать двухслойную нейронную сеть (со скрытым промежуточным слоем) прямого распространения, структурная схема которой представлена на рис. 4.

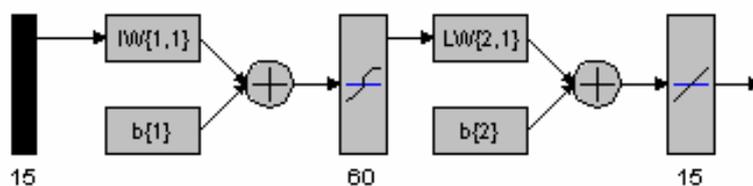


Рис. 4 Структура нейронной сети

Первый и промежуточный слой содержат по 60 нейронов (рис.4), а второй 15. Все выходы нейронов предшествующих слоев связаны со всеми входами нейронов

текущего слоя. Таким образом, нейроны второго и скрытого слоя имеют по 60 входов. Каждый нейрон первого слоя обладает 15 входами и на них подается заранее подготовленный массив данных. В качестве функции активации нейронов первого и промежуточного слоя выбрана функция гиперболический тангенс, а в качестве функции активации второго слоя линейная пороговая функция.

Подбор функций активации и числа нейронов в первом слое подбирался экспериментально и исходил из качества обучения нейронной сети. В качестве одного из критериев правильного построения сети было принято, что сеть должна приблизиться к точному значению в ходе 100 эпох обучения. Использование числа нейронов в первом слое меньше 60 приводило к ухудшению качества обучения сети, а увеличение числа нейронов только усложняло процесс обучения, без видимого улучшения качества обучения.

Обучение нейронной сети, это один из основных этапов при создании рабочего алгоритма ее функционирования. От качества обучения зависит то, как сеть в дальнейшем будет работать. Первые эксперименты с нейронной сетью, когда в качестве исходных данных для обучения использовались данные, полученные для идеальных случаев, показали результаты ничуть не уступающие результатам, полученных при использовании матриц циркулянта. Однако при переходе к обработке данных, полученных в реальном эксперименте, качество ответов от нейронной сети, существенно уступало качеству ответов, полученных традиционным методом.

Включение в обучающий массив данных близких по своей структуре к данным, получаемым в ходе эксперимента, позволило существенно улучшить качество идентификации направления на источник. В настоящий момент нейронная сеть способна идентифицировать направление на источники фотонного излучения при отношении в случаях, когда отношение сигнал/фон составляет примерно 1,1.

Требования, предъявляемые к разрабатываемой аппаратуре поиска ИФИ, требуют от разработчика проводить расчетные и экспериментальные исследования по определению основных характеристик прибора. Такими характеристиками для ПДКК являются:

- предельная дальность обнаружения ИФИ;

- угловое разрешение;
  - прозрачность коллиматоры;
- и др.

Предельная дальность обнаружения ИФИ является одной из важных характеристик поисковых приборов. Ее определение осуществлялось для источника  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , активностью  $10^5$  Бк.

Схема эксперимента по определению предельной дальности обнаружения ИФИ представлена на рис. 5. Источник располагался на расстоянии  $R$  от лицевой поверхности детектора и после каждой серии измерений (1 измерение для 15 положений коллиматора) перемещался с шагом 5 см. По завершении эксперимента данные были обработаны по двум методам. Результаты этих расчетов представлены на рис. 6 - 12.

Из результатов видно, что с увеличением расстояния между детектором и источником точность определения направления на ИФИ уменьшается. В первую очередь это связано уменьшением доли полезного сигнала в общем счете. Так для результатов представленных на рис. 9 для  $^{137}\text{Cs}$  расстояния 40 см, счет, получаемый от детектора с закрытыми и открытыми щелями равен в пределах погрешности 15-20%.

Дальность обнаружения  $^{137}\text{Cs}$  активностью  $10^5$  Бк составила около 30 см.

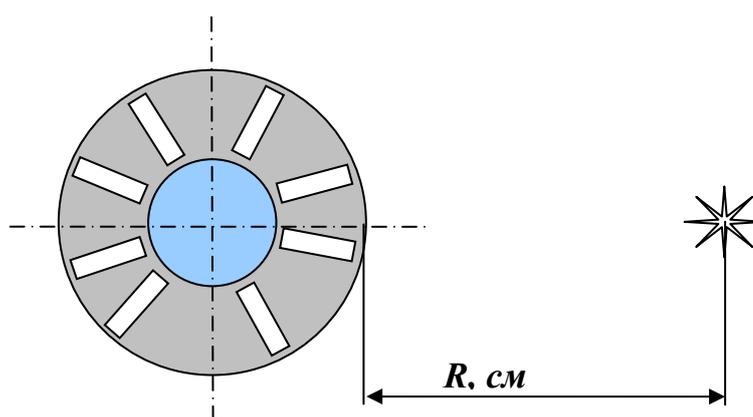


Рис. 5. Схема эксперимента по определению дальности обнаружения источника

Метод, построенный на основе нейронной сети, в данном эксперименте не использовался, так как изначально сеть была обучена для другой комбинации открытых и закрытых щелевых отверстий.

Аналогичные результаты были получены и при использовании источника  $^{241}\text{Am}$ .

Видно, что предельная дальность обнаружения источника  $^{241}\text{Am}$  активностью  $10^5$  Бк составляет около 10 см, при обработке данных традиционным методом, и 15 см, при применении метода основанного на нейронных сетях. Наглядно видно, что при использовании метода, построенного на нейронных сетях дальность обнаружения выше примерно в 1,5 раза.

Эксперименты по определению углового разрешения позволяют судить о возможностях детектора различить два и более источников расположенных вместе. Эти эксперименты проводились с участием двух источников различной энергии  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Геометрия эксперимента представлена на рис. 13. Источник 1 располагался на против центра 1 щели на расстоянии  $R$ , а источник 2 устанавливался на том же расстоянии, но под углом  $\varphi$ . Проводя серии экспериментов с изменением угла между 2-мя источниками были получены и обработаны данные, значения которых представлены на рис. 14-17.

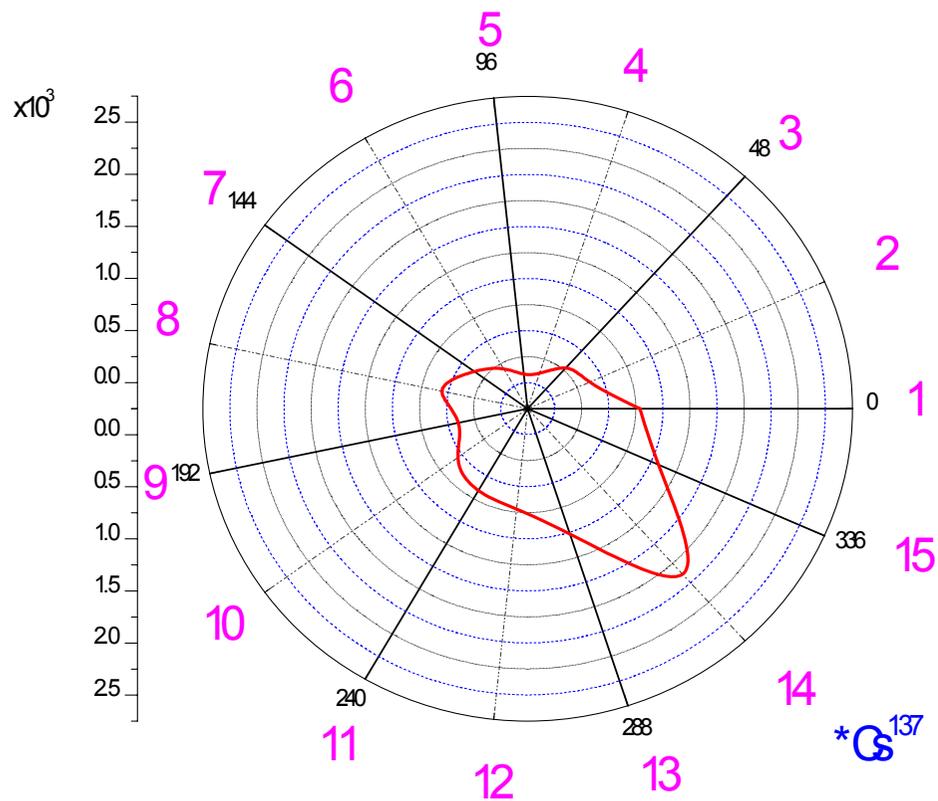


Рис. 6 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов. Расстояние детектор – источник 10 см.

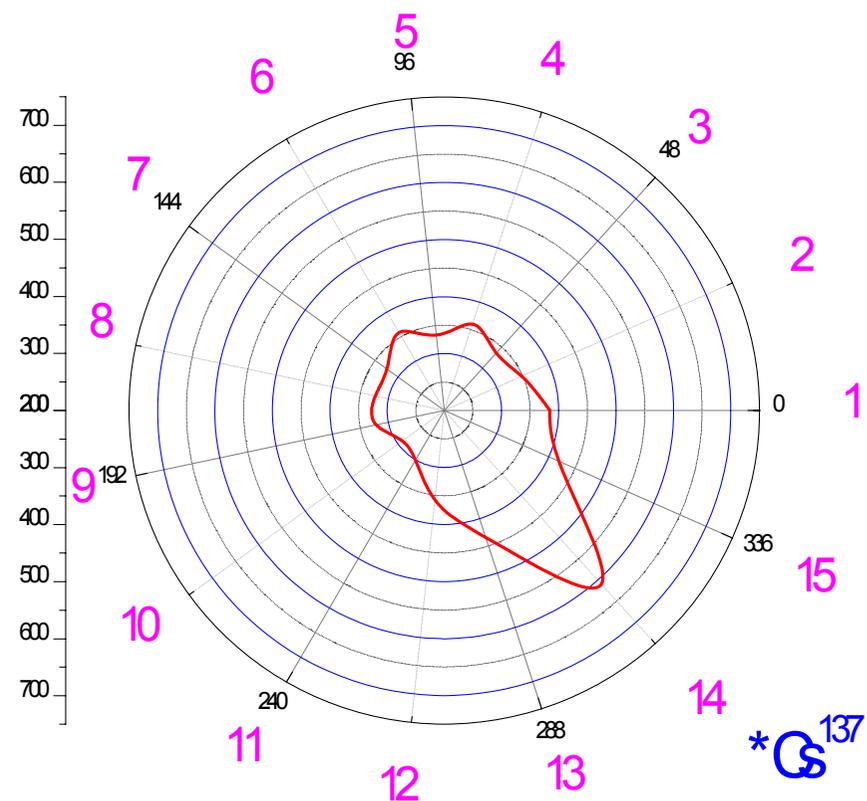


Рис. 7 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов. Расстояние детектор – источник 20 см.

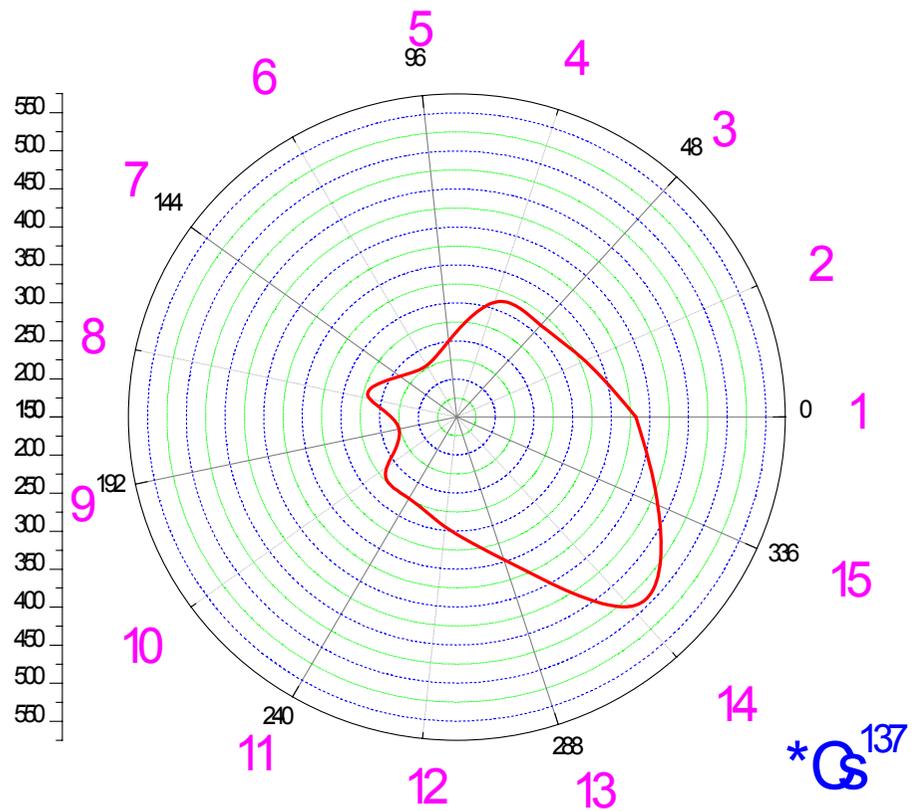


Рис. 8 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов. Расстояние детектор – источник 30 см.

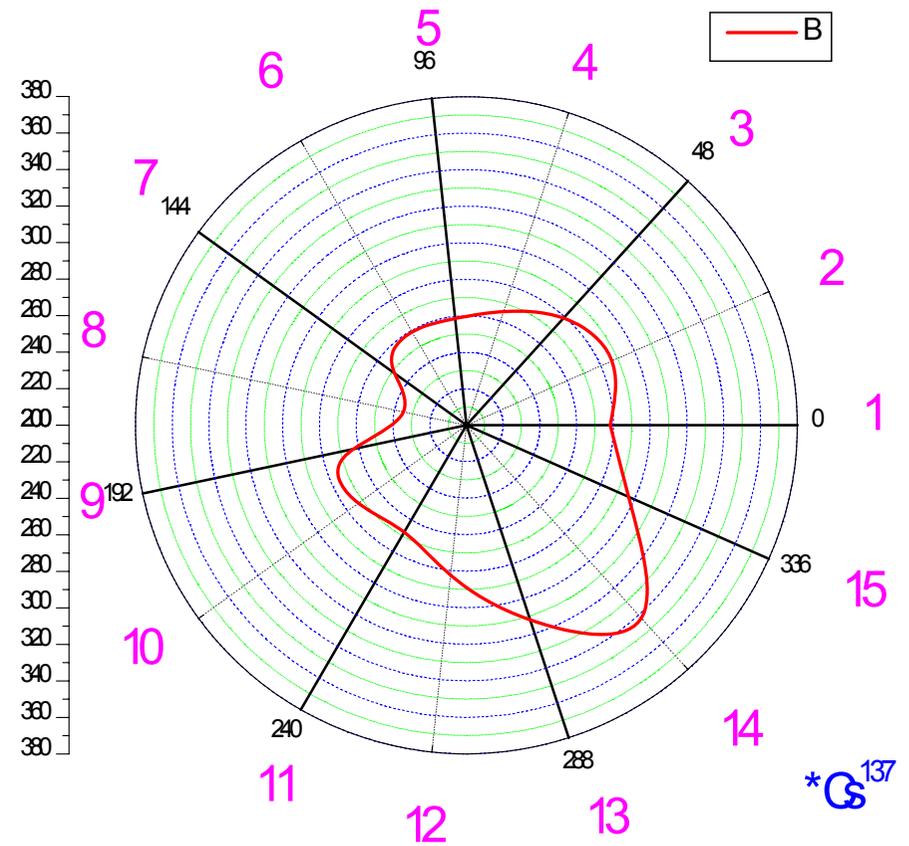
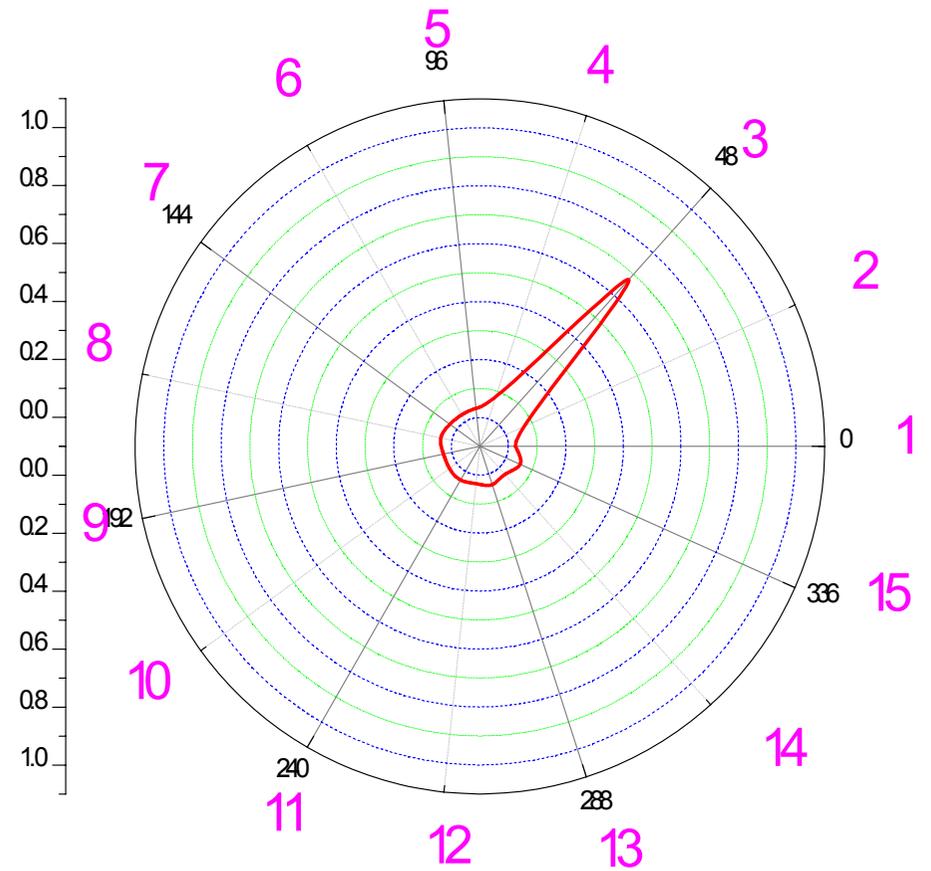
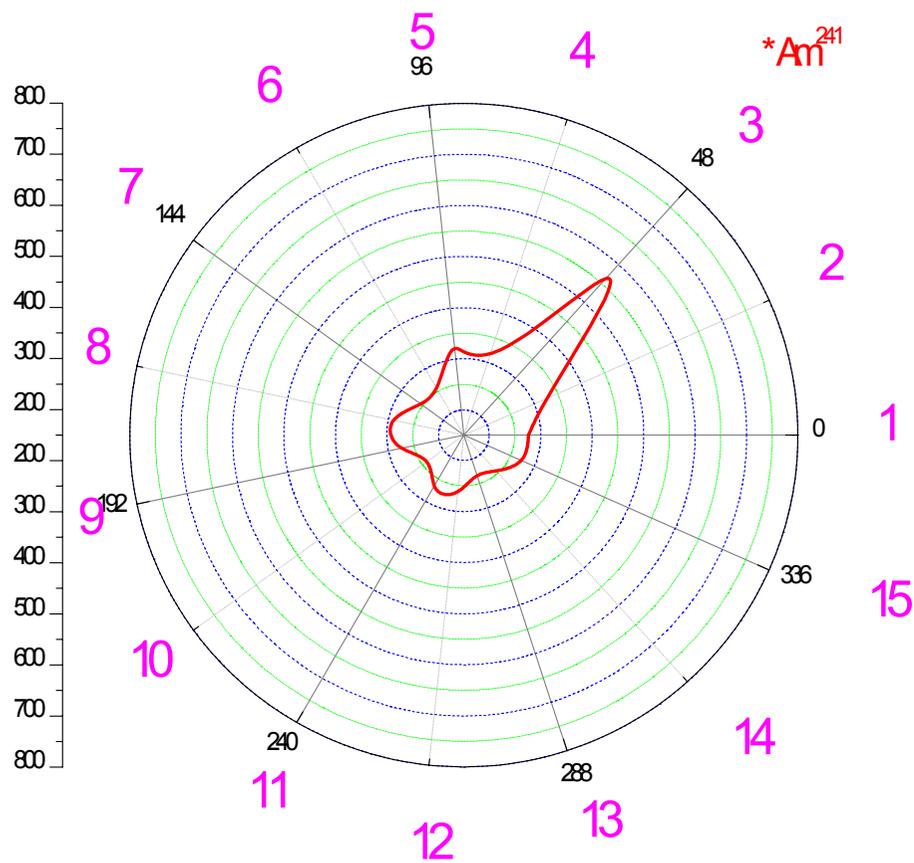
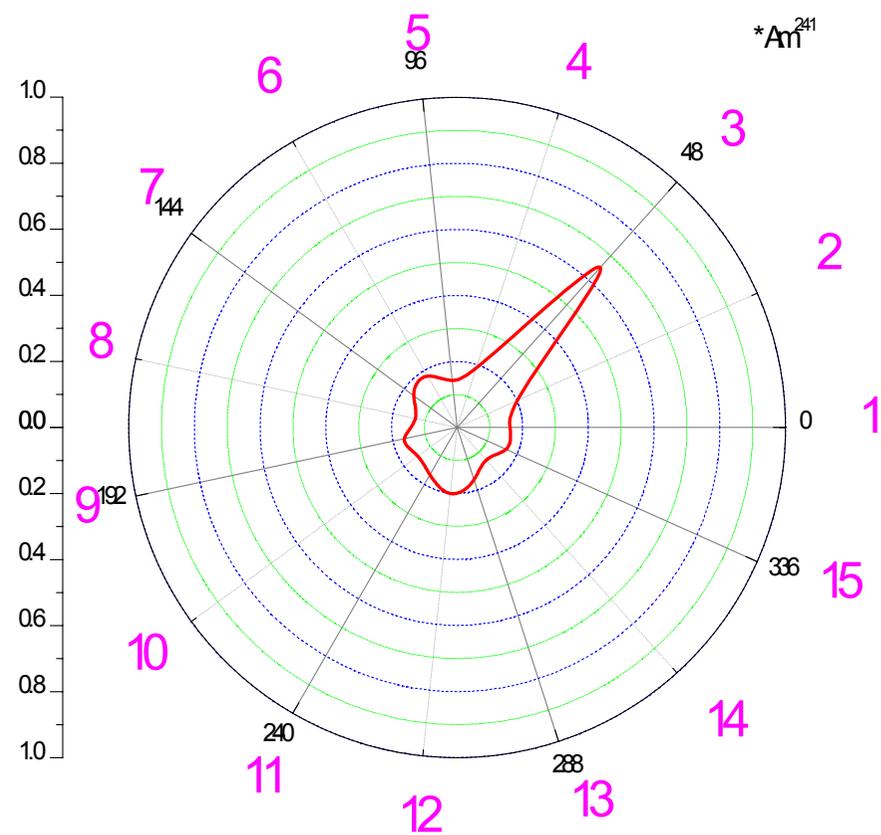
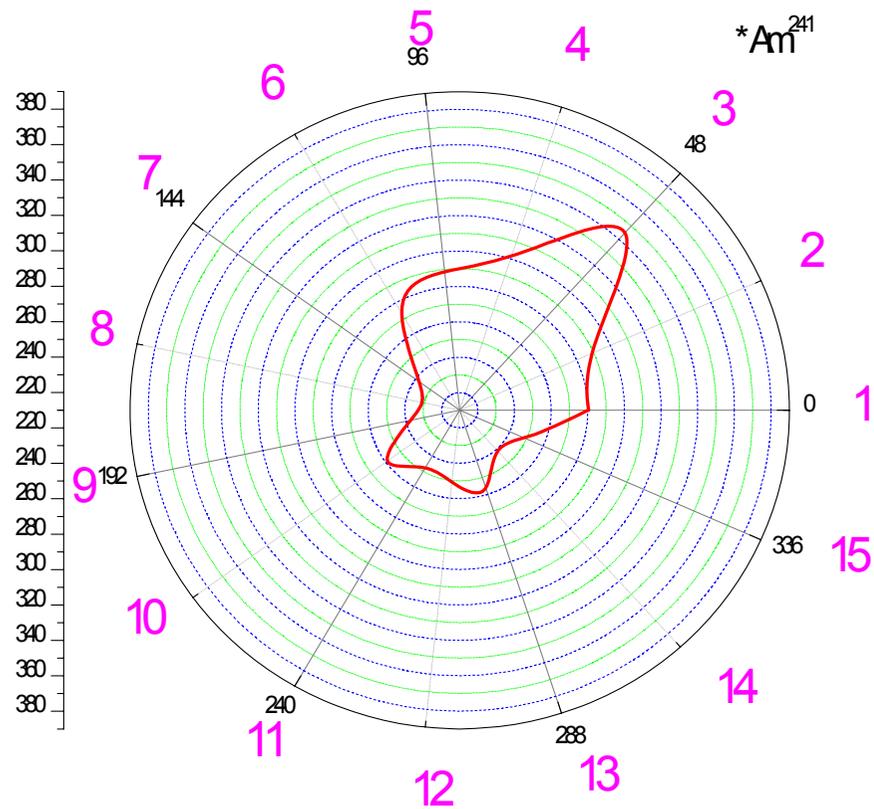


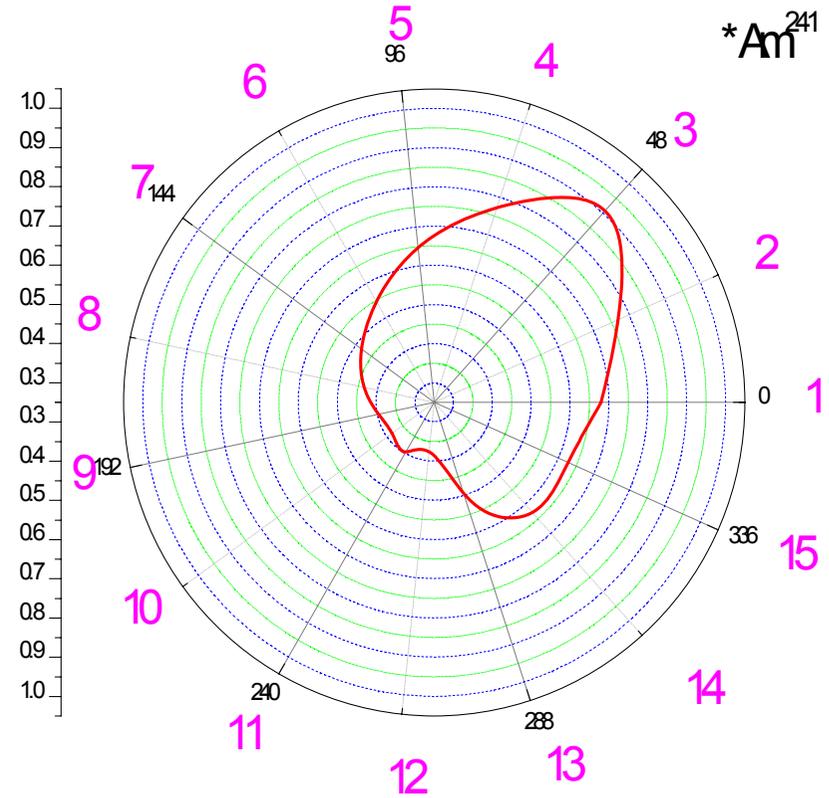
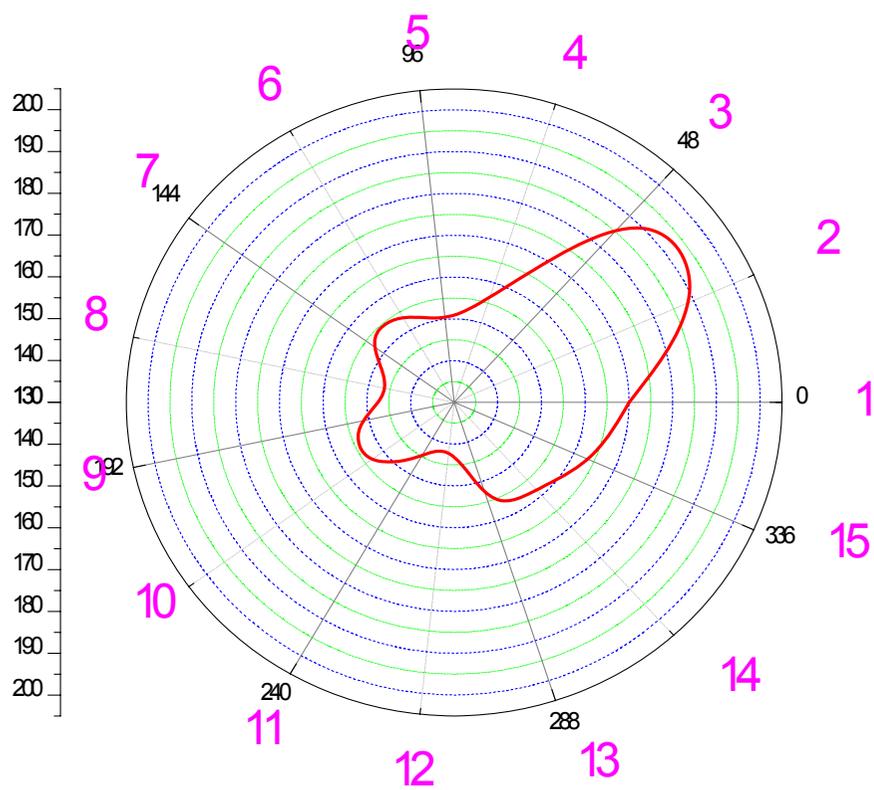
Рис. 9 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов. Расстояние детектор – источник 40 см.



а) б)  
 Рис. 10 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{241}\text{Am}$ , расстояние детектор – источник 5 см.  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.



а) б)  
 Рис. 11 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{241}\text{Am}$ , расстояние детектор – источник 10 см.  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.



а) б)  
 Рис. 12 Результаты расчетов по определению направления на источник  $^{241}\text{Am}$ , расстояние детектор – источник 15 см.  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.

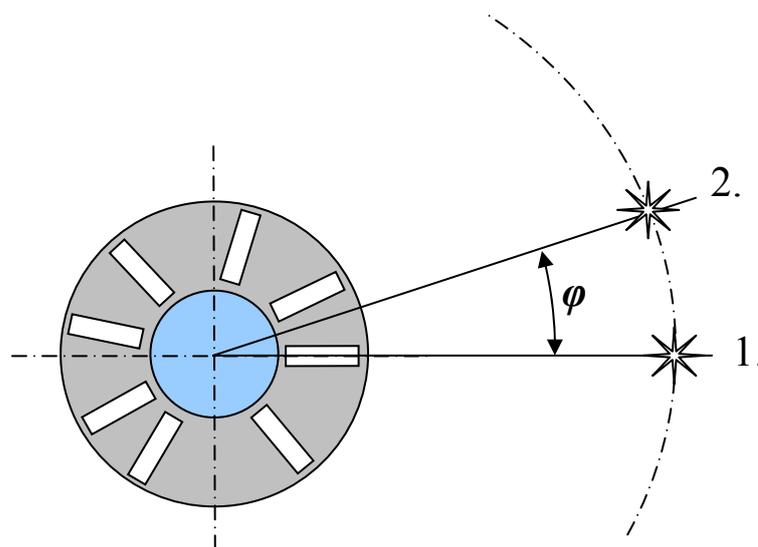
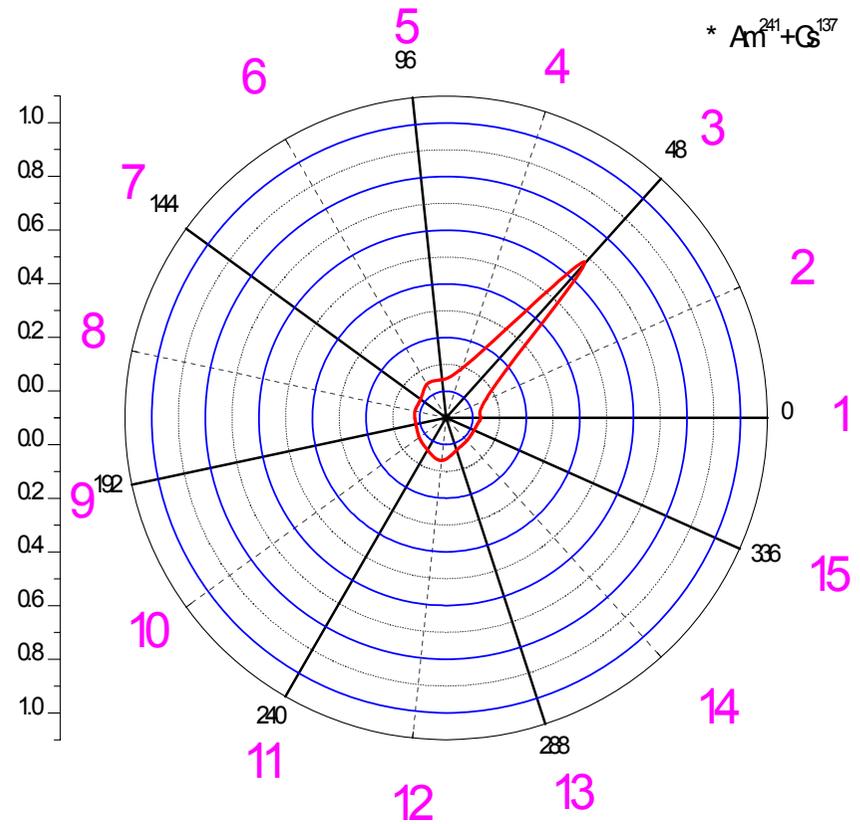
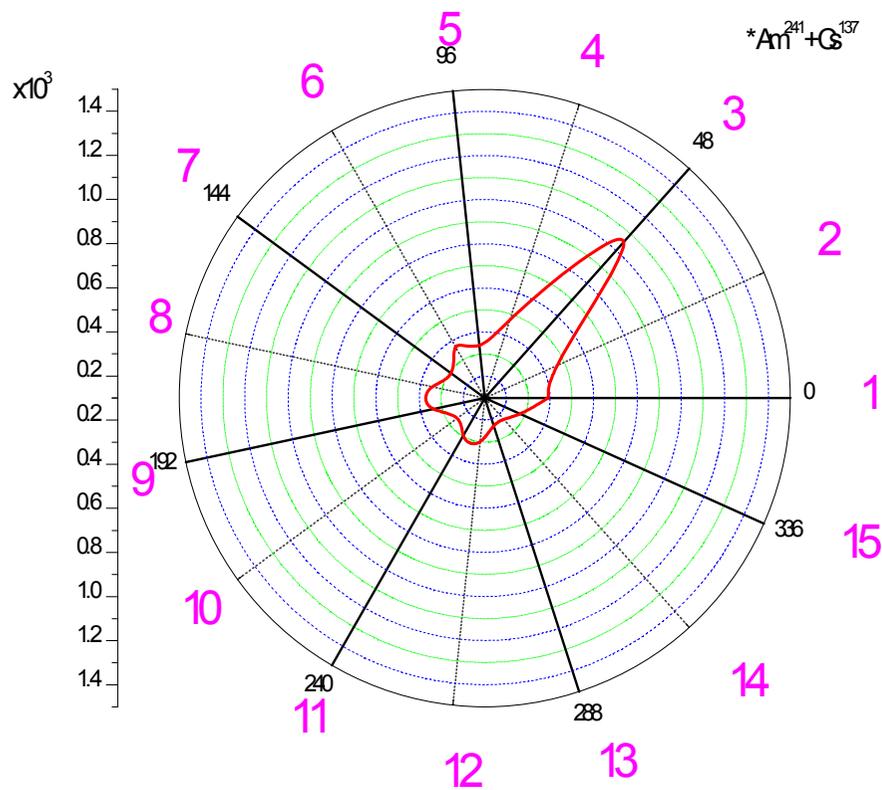


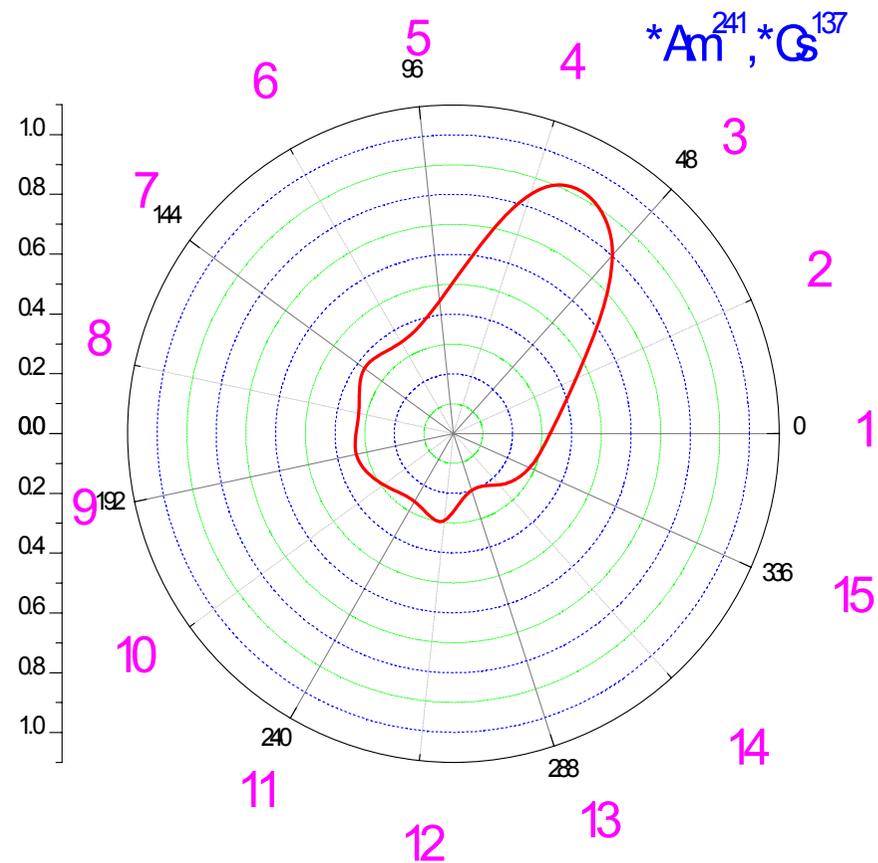
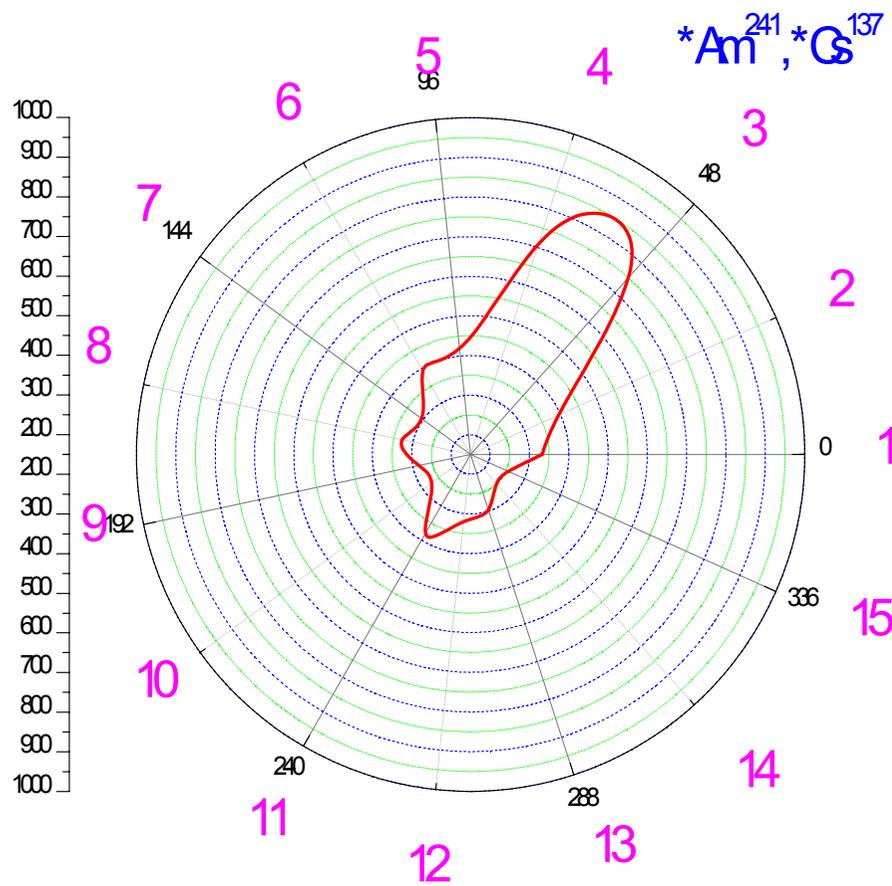
Рис. 13 Схема эксперимента по определению углового разрешения двух источников

Из представленных результатов видно, что с увеличением угла между источниками фотонного излучения происходит уширение линии указывающей направление на ИФИ. Этот факт может быть свидетелем о наличии двух источников, однако это так же может говорить о том, что единственный источник расположен не строго против центра щели. Следовательно, четкое разделение 2-х источников возможно только на углах более  $24^\circ$ . Для данных измерений угол, при котором можно разрешить два источника составил  $48^\circ$  для метода основанного на свойствах матриц циркулянтов, и  $36^\circ$  для метода, построенного с применением нейронной сети.

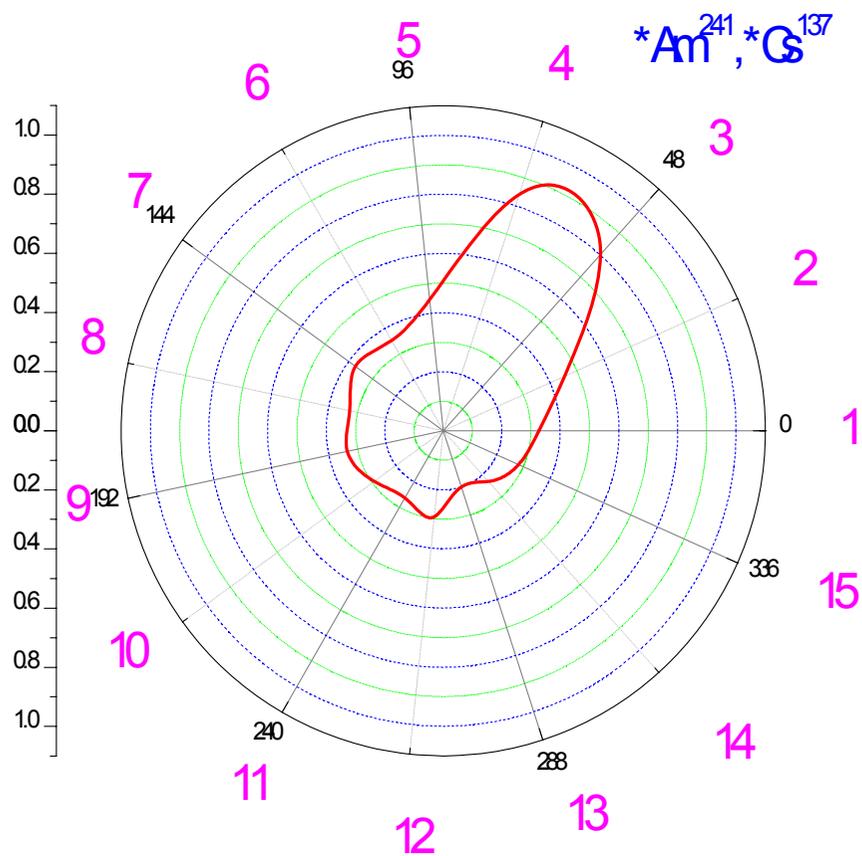
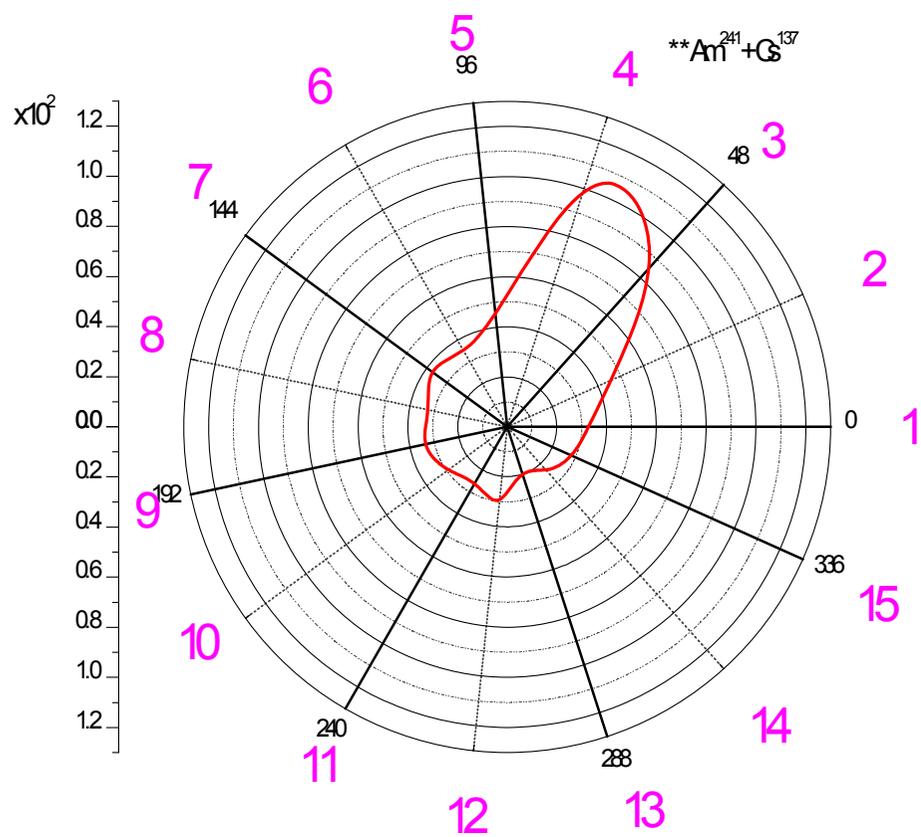
Прозрачность коллиматора – это показатель того насколько эффективно защищает он детектор при закрытых щелях от проникающего излучения. Определение прозрачности коллиматора осуществлялось в ходе следующего эксперимента. Вначале в коллиматоре были закрыты все щели, и перед коллиматором поочередно располагались источники фотонного излучения  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Все измерения проводились в течение 3 мин. Затем эксперимент был повторен, но с уже открытыми щелями. Для учета вклада фонового излучения было снято распределение фона.



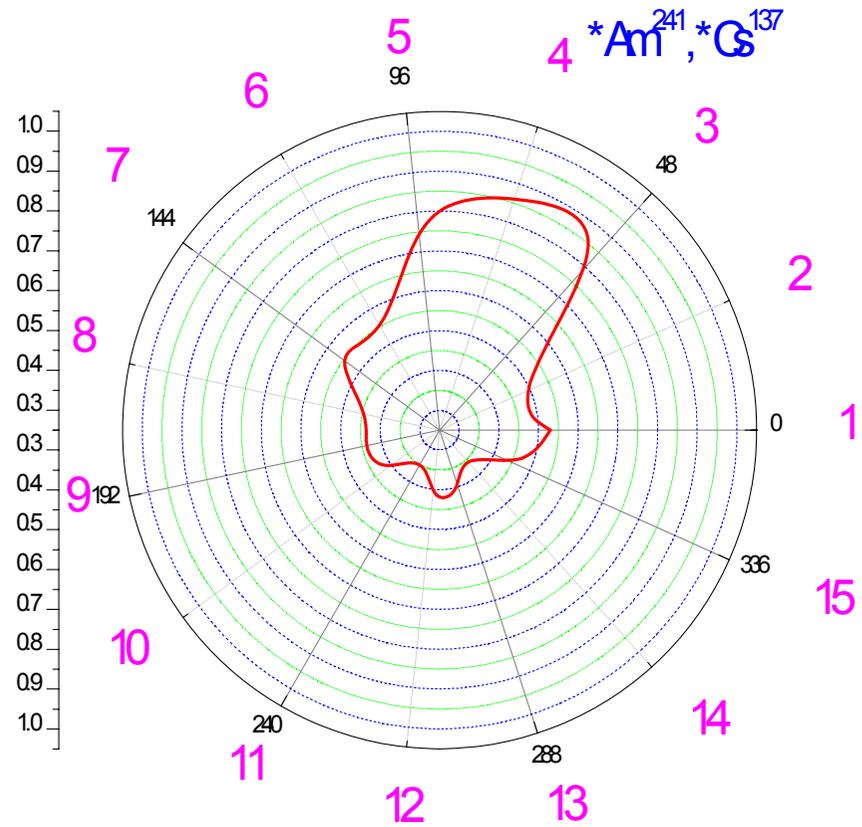
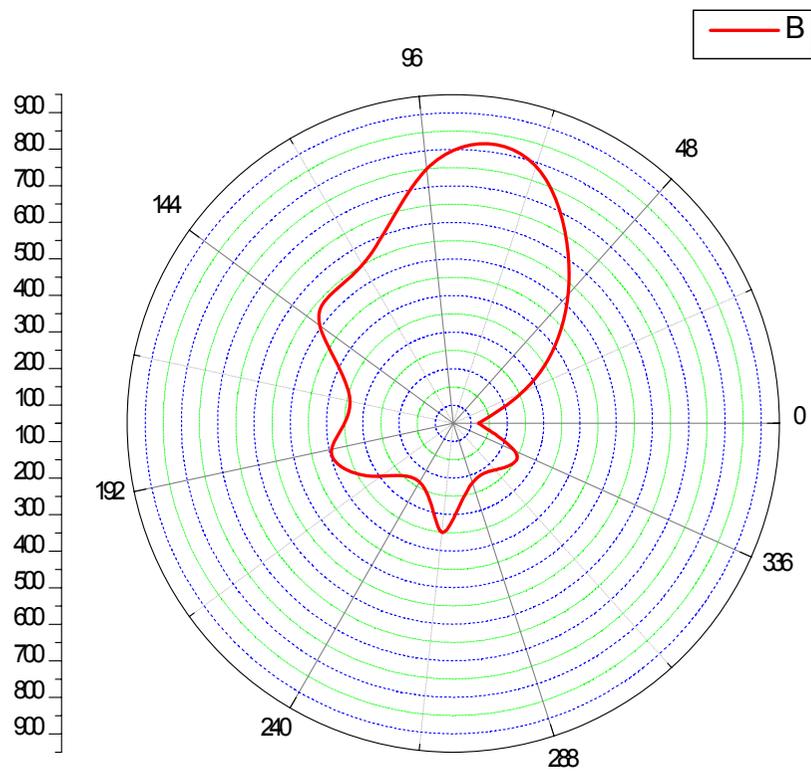
а)  
 Рис. 14 Результаты расчетов по определению углового разрешения 2-х источников, угол между источниками  $6^\circ$ .  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.



а) б)  
 Рис. 15 Результаты расчетов по определению углового разрешения 2-х источников, угол между источниками  $12^\circ$ .  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.



а) б)  
 Рис. 16 Результаты расчетов по определению углового разрешения 2-х источников, угол между источниками  $24^\circ$ .  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.



а)  
 б)  
 Рис. 17 Результаты расчетов по определению углового разрешения 2-х источников, угол между источниками  $36^\circ$ .  
 а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.  
 б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.

Прозрачность коллиматора для каждого значения энергий источника определялась по следующей формуле:

$$\omega = \frac{N_{close} - N_{bg}}{N_{open} - N_{bg}},$$

где  $N_{open}$  - сумма импульсов под пиком полного поглощения, когда щели коллиматора открыты,  $N_{close}$  - сумма импульсов под пиком полного поглощения когда щели коллиматора закрыты,  $N_{bg}$  - сумма импульсов в месте расположения пика полного поглощения.

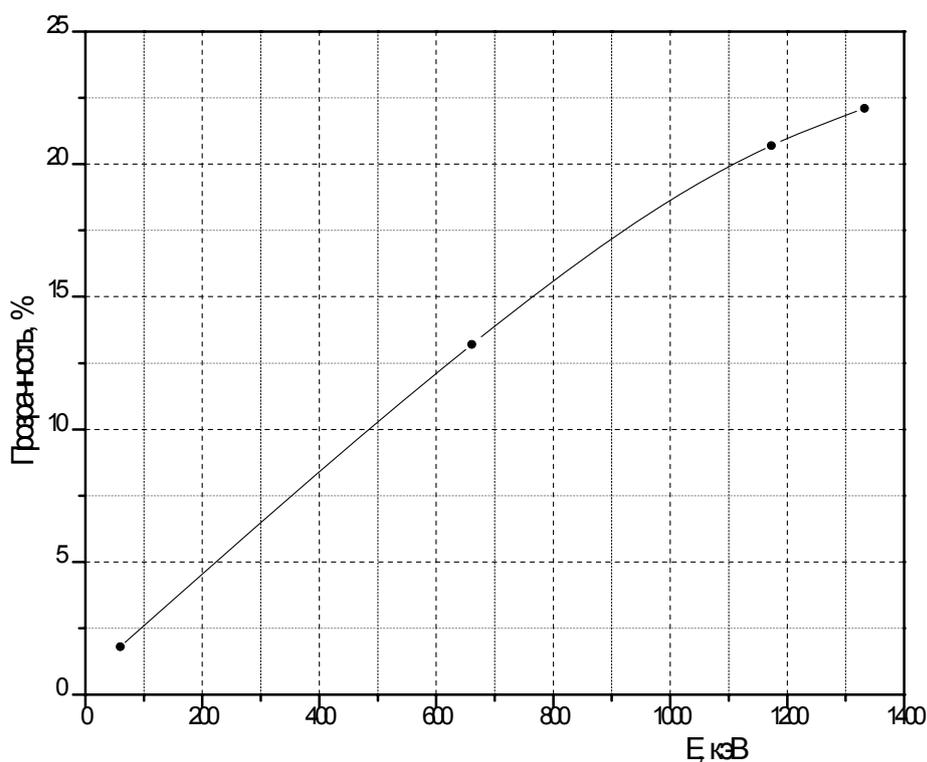


Рис. 18. Зависимость прозрачности коллиматора от энергии падающего фотонного излучения

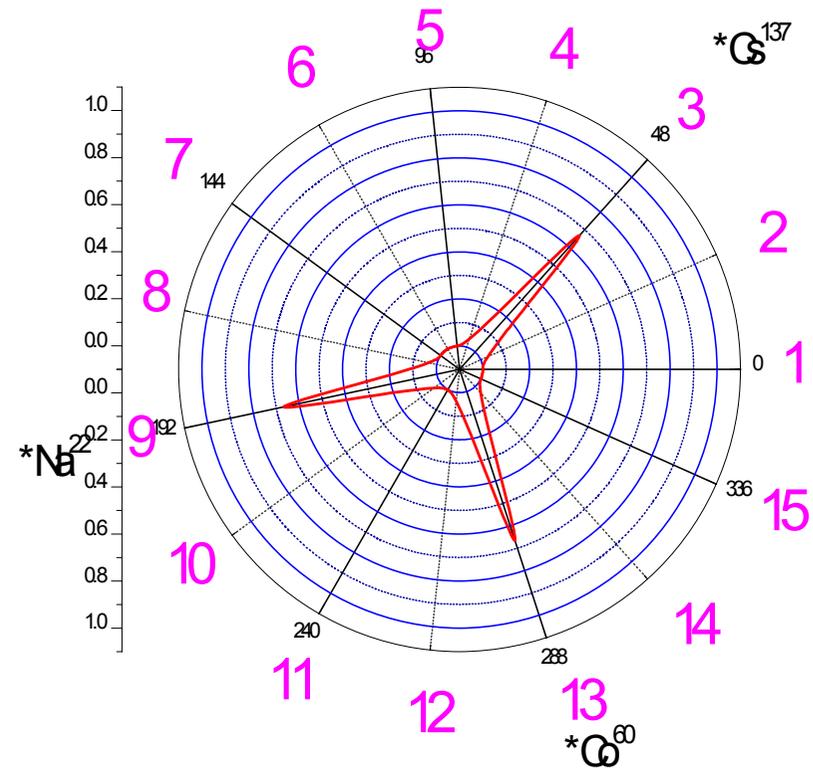
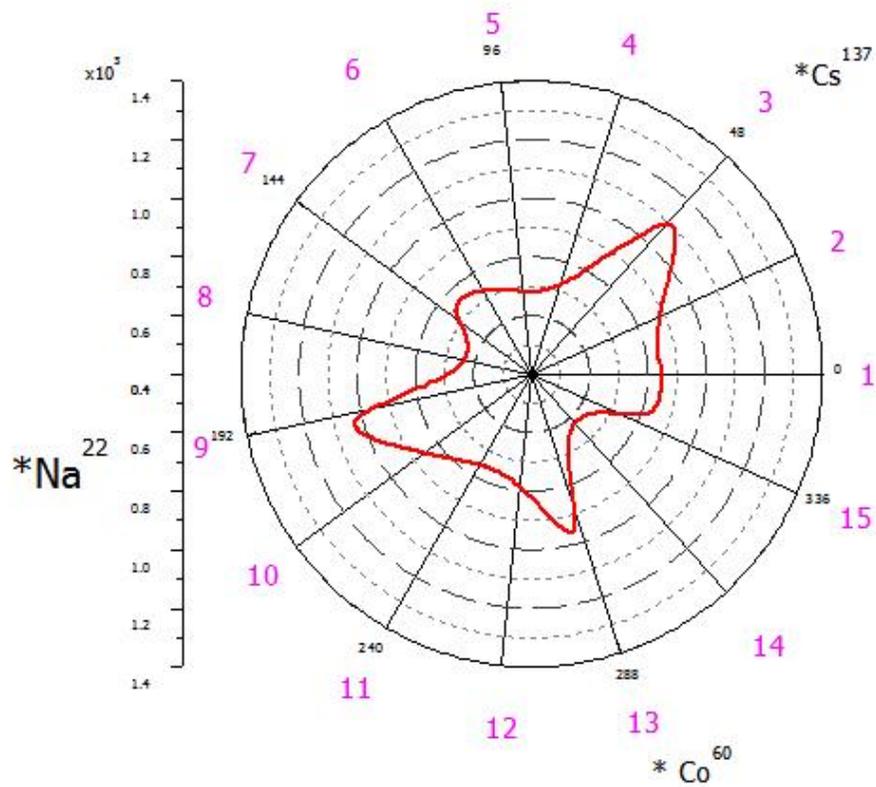
Результаты расчетов приведены на рис. 18. Погрешность определения прозрачности коллиматора детектора составила 4%.

Общий эксперимент по выявлению направления на ИФИ в физически ограниченном месте проходил в лаборатории кафедры «Прикладная ядерная физика» МИФИ. Вокруг детектора были расположены три источника фотонного излучения ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , и  $^{22}\text{Na}$ ) и предметы, позволяющие физически ограничить перемещение детектора. Источники располагались в секторах 3, 9, 13. Среднее расстояние между

детектором источниками составило 30 см. Ограничивающий радиус – 50 см. Продолжительностью всего эксперимента составила 7 минут

Результаты, полученные в ходе этого эксперимента, были обработаны с помощью двух методов и представлены в виде круговой диаграммы (рис. 19). Видно, что метод, построенный на основе матриц циркулянтов, позволяет определить направление на все 3 источника, однако в распределении присутствуют и два дополнительных направления более низкой интенсивности. Средняя точность определения направления на источник в данном случае составила 70%.

Второй метод дал более точный ответ на место положение источников. Точность определения направления в данном случае составила 99%. Это еще раз говорит о преимуществе методов основанных на нейронной сети для решения такого класса задач.



a)

б)

Рис. 19 Результаты определения направления на источники фотонного излучения в сложной геометрии.

а) полученных с помощью метода, основанного на свойствах матриц циркулянтов.

б) полученных с помощью метода, построенного с использованием нейронной сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной итог диссертационной работы заключается в разработке двух методов определения направления на источник фотонного излучения. Для достижения этого результата были физически обоснован и создан алгоритм определения направления на источник фотонного излучения с использованием панорамного датчика с кодирующим коллиматором, спроектирован и изготовлен макет панорамного датчика, проведен ряд исследований, подтверждающих работоспособность предложенного алгоритма и методов.

Эти выводы подтверждаются следующими результатами.

1. Разработан и создан панорамный датчик с кодирующим коллиматором, который позволяет определять направление на источник фотонного излучения. Его конструкция позволяет существенно снизить влияние шумов (примерно в 4 раза) по сравнению со сканирующими детекторами.
2. В работе предложен алгоритм определения направления на источник фотонного излучения, с помощью которого можно легко локализовать источники излучений в физически ограниченных местах (шахтах, колодцах). При дальнейшем развитии этого алгоритма, и улучшений характеристик панорамного датчика с кодирующим коллиматором, можно будет говорить о возможности точного определения местоположения, с указанием конкретного не только направления, но и расстояния, и активности источника. Проверка работоспособности алгоритма проводилась на действующем макете панорамного датчика, и подтверждает такую возможность.
3. Разработан метод определения направления на источник фотонного излучения с применением классического математического метода (матриц циркулянта), основные свойства которых заложены в идею конструкции панорамного датчика с кодирующим коллиматором. Экспериментальные исследования по определению направления на источник показали хорошую работоспособность данного метода.
4. Разработан метод определения направления на источник фотонного излучения с применением двухслойной нейронной сети прямого распространения, который позволяет повысить качество выявляемости направления на источник. Так метод хорошо работает при отношении сигнал / шум 11:10, в то время как метод, основанный на матрице циркулянта работает при отношении 15:10.

5. В работе проведено сравнение работы двух разработанных методов определения направления на источник фотонного излучения. Видно, что метод, построенный с использованием нейронной сети, дает более качественные результаты по определению направления на источник фотонного излучения, чем метод, построенный с применением матриц циркулянта, о чем свидетельствуют проведенные экспериментальные исследования.

#### **Список научных трудов:**

1. Найнг Вин, Колесников С.В., Новиков Д.В. и др. Программный комплекс для математического моделирования ядерно-физических приборов и устройств// Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Том 5, М.: МИФИ, 2005, с. 237
2. Найнг Вин, Колесников С.В., Новиков Д.В. и др. Панорамный датчик с кодирующим коллиматором для обнаружения радиоактивных источников// 4-я Курчатовская молодежная научная школа. Сборник аннотаций работ. РНЦ "Курчатовский институт", Москва, 2006, с. 23
3. Найнг Вин, Колесников С.В., Новиков Д.В. и др. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов по откликам, полученным от многослойного детектора нейтронов, с применением нейронной сети// Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Том 5, М.: МИФИ, 2007, с. 108
4. Найнг Вин, Колесников С.В., Новиков Д.В. и др. Локализация источников гамма-излучения панорамным датчиком с кодирующим коллиматором// Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Том 5, М.: МИФИ, 2007, с. 111
5. Найнг Вин, Колесников С.В., Новиков Д.В. и др. Панорамный датчик с кодирующим коллиматором для обнаружения радиоактивных источников// Журнал «Инженерная физика», 2007 (в печати)